การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากขุยมะพร้าวผสมชีวมวลเหลือทิ้ง

PRODUCTION OF FUEL PELLETS FROM COCONUT COIR DUST MIXED WITH BIOMASS WASTES

นภาดา วิเชียรพงษ์* ทวีทรัพย์ เจือพานิช และ พรรณทิพา เมียงแก

Napada Wichianphong*, Taweesub Juepanit and Phantipa Miangkae

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์

Faculty of Science and Technology, Rajabhat Rajanagarindra University

*corresponding author e-mail: napada.wich@gmail.com

(Received: 14 September 2020; Revised: 23 November 2020; Accepted: 26 November 2020)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากขุยมะพร้าวและชีวมวลเหลือใช้ในชุมชนเพื่อพัฒนาแหล่งพลังงานทางเลือก และเป็นการนำเอาของเหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยทำการผลิตก้อนเชื้อเพลิงด้วยเครื่องอัดเม็ดได้เป็นแท่งเชื้อเพลิงขนาดเล็กที่มีความยาว 1–2 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6 มิลลิเมตร โดยวัตถุดิบหลักที่นำมาใช้ในการผลิต คือ ขุยมะพร้าว ซึ่งเป็นของเหลือใช้ทางการเกษตรที่พบมากในอำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา นำมาผสมกับวัสดุเหลือใช้ชนิดอื่นๆ ที่หาได้ง่ายในพื้นที่ชุมชน ได้แก่ มูลวัว มูลไก่ มูลเป็ด แกลบ ขี้เลื่อย และใบมะม่วง ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับ 60 : 40 รวมทั้งศึกษาอัตราส่วนผสมของตัวประสานที่นำมาใช้ ได้แก่ น้ำแป้งเปียกจากแป้งมันสำปะหลังเหลือทิ้งคุณภาพต่ำจากอุตสาหกรรมแป้ง และกากน้ำตาลซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการผลิตน้ำตาล จากนั้นทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของชีวมวลอัดเม็ดที่ได้ ได้แก่ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง ค่าความชื้น ค่าเถ้า ค่าสารระเหย และค่าคาร์บอนคงตัว จากการศึกษาพบว่าเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่ได้มีค่าความร้อนอยู่ในช่วง 3,583–4,225 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม โดยเมื่อนำขุยมะพร้าวมาใช้ร่วมกับขี้เลื่อยที่อัตราส่วน 60 : 40 และใช้น้ำแป้งเปียกเป็นตัวประสานเพียงอย่างเดียวจะทำให้ได้เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีค่าความร้อนสูงที่สุด เท่ากับ 4,225 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม นอกจากนี้พบว่าค่าความชื้น และค่าเถ้าของเชื้อเพลิงที่ได้ มีค่าอยู่ในเกณฑ์ของมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ถ่านอัดแท่ง และถ่านไม้หุงต้ม

คำสำคัญ: ชีวมวล พลังงานทางเลือก เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด วัสดุเหลือใช้ ขุยมะพร้าว

Abstract

The objective of this research was to produce biomass fuel pellets from agricultural wastes in order to explore an alternative energy source and disposal of the agricultural waste in community. In this study, dried biomass was compressed with pelletizer machine into small cylindrical pellets with approximately 6 mm in diameter and 1–2 mm in length. The obtained fuel pellets was made from primary raw material as coconut coir dust, an abundantly available waste material found in Bang Kla district of Chachoengsao province, mixed with different kinds of waste, including animal manure from chicken, duck and cow, rice husk, sawdust and mango leaves, at the weight ratio of 60 : 40. In addition, Agro–industrial wastes, such as low–quality tapioca starch rejected and molasses were used as binders in the preparation of pellets. Parameters of the obtained pellets such as heating value, moisture, ash, volatile matter, fixed carbon content were investigated. It was found that the heating value of the obtained fuel pellets was between 3,583—4,225 kilocalories per kilogram (kcal/kg). The pellets made from coconut coir dust mixed with sawdust (60 : 40) using starch paste as a binder provided the highest heating value as 4,225 kcal/kg. Moreover, the other properties of resulting pellets, including moisture, ash and fixed carbon content, were in the range of standard values of community product chunk–compressed charcoal and common charcoal.

Keywords: Biomass, Alternative energy, Biomass fuel pellets, Wastes, Coconut coir dust

บทนำ

พลังงาน เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของประเทศและการดำเนินชีวิตของประชาชน แต่ในปัจจุบันประเทศไทยมีอัตราการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และไม่สามารถเพิ่มปริมาณการผลิตในประเทศได้ทันกับความต้องการการใช้งาน ทำให้ประเทศไทยต้องพึ่งพาการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศอย่างต่อเนื่อง ซึ่งคิดเป็นมูลค่ามหาศาล (คงเดช และคณะ, 2562; Rengsirikul et al., 2013) ดังนั้นการลดปริมาณการใช้พลังงานที่ใช้แล้วหมดไปหรือที่เรียกว่าพลังงานสิ้นเปลือง เช่น น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ รวมทั้งการหาแหล่งพลังงานอย่างอื่นมาใช้ทดแทนเพื่อให้มีพลังงานเพียงพอกับความต้องการของประชากร จึงถือเป็นสิ่งจำเป็นและเร่งด่วนที่จะช่วยชะลอปัญหาการขาดแคลนเชื้อเพลิง (วิราช, 2560) ทั้งนี้ปัจจัยสำคัญที่นำมา

พิจารณาเพื่อหาพลังงานทดแทน ได้แก่ เป็นเชื้อเพลิงที่มีราคาถูก มีปริมาณเพียงพอ จัดหาได้ง่ายในท้องถิ่น รวมทั้งกรรมวิธีในการนำมาใช้ไม่ยุ่งยากซับซ้อน (ลดาวัลย์ และคณะ, 2559)

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีลักษณะภูมิประเทศที่เอื้ออำนวยต่อการเพาะปลูก มีพื้นที่ที่มีดินและน้ำอุดมสมบูรณ์ ประชากรส่วนใหญ่จึงนิยมประกอบอาชีพทางการเกษตร ทำให้ประเทศไทยมีผลผลิตทางการเกษตรและมีวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรอยู่เป็นจำนวนมาก (ศิริวัชรี และคณะ, 2563) ดังนั้นแหล่งพลังงานทดแทนที่สามารถหาได้ง่ายและประเทศไทยมีศักยภาพสูง คือ พลังงานชีวมวลจากเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และเศษวัสดุเหลือทิ้งหรือของเสียจากกระบวนการผลิต เช่น ขุยมะพร้าว แกลบ ชานอ้อย เศษไม้ ใบไม้ เปลือกผลไม้ กากน้ำตาล มูลสัตว์ ขี้เลื่อย เป็นต้น (กรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2558) แนวทางหนึ่งที่มีผู้ให้ความสนใจเป็นจำนวนมาก คือ การนำวัสดุชีวมวลเหลือใช้มาแปรรูปให้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง ซึ่งนอกจากจะได้พลังงานทดแทนที่นำไปใช้งานในรูปแบบต่างๆ ที่ช่วยลดภาระค่าใช้จ่ายจากการจัดซื้อเชื้อเพลิงจากภายนอกมาใช้แล้ว ยังเป็นการลดปริมาณวัสดุเหลือใช้ที่ต้องกำจัดให้เหลือน้อยลง รวมทั้งเป็นการนำเศษวัสดุมาใช้ให้เกิดประโยชน์และเพิ่มมูลค่าให้กับเศษวัสดุเหลือใช้ นอกจากนี้พลังงานชีวมวลจัดเป็นพลังงานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สุทธิตลอดวัฏจักรชีวิตของมันมีค่าเท่ากับศูนย์ (Carbon neutral) ทำให้ไม่ส่งผลต่อภาวะโลกร้อน (Global warming) ดังนั้น พลังงานชีวมวลจากวัสดุเศษเหลือทางการเกษตรจึงเป็นแหล่งพลังงานที่เหมาะสมต่อการพัฒนาที่ยั่งยืน (ชิษณุชา และขวัญฤทัย, 2559; ธนาพล และคณะ, 2558)

เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดหรือเชื้อเพลิงเขียวอัดเม็ด เป็นแหล่งพลังงานทางเลือกหนึ่งที่ได้จากกระบวนการแปรรูปวัสดุชีวมวลหรือของเสียด้วยวิธีการอัดเป็นก้อน โดยอาศัยความเหนียวของยางในวัสดุเหล่านั้นเป็นตัวเชื่อมประสานหรืออาจมีการเติมตัวประสานลงไปเป็นส่วนประกอบ เมื่อผ่านกระบวนการอัดแลวจะไดเม็ดชีวมวลที่มีสมบัติสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนฟืนไม้ถ่านหรือแก๊สหุงต้มได้ นอกจากนี้การอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดเชื้อเพลิง ยังเป็นวิธีที่มีขั้นตอนที่ไม่ยุ่งยากและสามารถทำได้ง่ายในชุมชน ได้เชื้อเพลิงที่จุดติดไฟได้ง่ายกว่าฟืนและถ่าน และเป็นพลังงานสะอาด (ประลอง, 2558) ซึ่งในปัจจุบันได้มีการทดลองนำเอาวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหลายชนิดมาผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง เช่น ฟางข้าวและซังข้าวโพด (ศิรินุช และคณะ, 2548) เปลือกสับประรด (ธนาพล และคณะ, 2558ก) ทางมะพร้าว (ธนาพล และคณะ, 2558ข) เปลือกมะขาม (กิ่งกานต์ และคณะ, 2557) เศษฟางข้าวและเศษลำไย (ลดาวัลย์ และคณะ, 2559) ต้นปาล์มน้ำมันและทางใบปาล์มน้ำมัน (เตือนใจ และคณะ, 2561) เปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟ (จุฑาภรณ์ และกนกวรรณ, 2561) เปลือกทุเรียนและเปลือกมังคุด (วิลาสินี และวิสาขา, 2562) และกะลากาแฟและเยื่อหุ้มเมล็ดกาแฟ (ปัญจรัตน์ และคณะ, 2559)

ในงานวิจัยนี้ได้ทดลองนำเอาวัสดุเศษเหลือทางการเกษตรและชีวมวลที่หาได้ง่ายในท้องถิ่นจังหวัดฉะเชิงเทรา มาแปรรูปให้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด โดยวัสดุหลักที่ใช้ คือ ขุยมะพร้าว ร่วมกับวัสดุชีวมวลเหลือใช้ชนิดต่างๆ ได้แก่ มูลไก่ มูลเป็ด มูลวัว แกลบ ขี้เลื่อย และใบมะม่วง ผสมกันที่อัตราส่วนเท่ากับ 60 : 40 โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้ขุยมะพร้าวในปริมาณสัดส่วนที่มากกว่าวัตถุดิบร่วมชนิดอื่น เนื่องจากขุยมะพร้าวเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่หาได้ง่าย อีกทั้งมีปริมาณมากในเขตชุมชนอำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา ซึ่งเป็นพื้นที่ปลูกมะพร้าวน้ำหอมแหล่งใหญ่ โดยสมบัติของเชื้อเพลิงที่ทำการศึกษา ได้แก่ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง ค่าความชื้น ค่าเถ้า ค่าสารระเหย และค่าคาร์บอนคงตัว นอกจากนี้ยังทำการศึกษาอัตราส่วนผสมของตัวประสาน 2 ชนิดที่มีต่อสมบัติของเชื้อเพลิงที่ได้ โดยตัวประสานที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นของเหลือใช้จากอุตสาหกรรมการแปรรูปพืชผลทางการเกษตร ได้แก่ แป้งมันสำปะหลังเหลือทิ้งคุณภาพต่ำจากการกระบวนการผลิตแป้งและกากน้ำตาลที่เป็นผลพลอยได้จากการกระบวนการผลิตน้ำตาลทราย ดังนั้นงานวิจัยนี้นอกจากจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาพลังงานทดแทนจากชีวมวลแล้ว ยังเป็นการสร้างแนวทางในการใช้ประโยชน์วัสดุเหลือใช้จากในชุมชนและจากอุตสาหกรรมอีกด้วย

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุและเครื่องมือ

วัสดุชีวมวลชนิดต่างๆ ที่ตากแดดแห้งแล้วในการวิจัยครั้งนี้ ได้แก่ ขุยมะพร้าวละเอียด มูลวัว มูลเป็ด มูลไก่ ขี้เลื่อย แกลบ และใบมะม่วงแห้ง ส่วนวัตถุดิบตัวประสาน ได้แก่ แป้งมันสำปะหลังเหลือทิ้งคุณภาพต่ำ และกากน้ำตาล

เครื่องสำคัญในการวิจัยครั้งนี้ ได้แก่ เครื่องบดย่อย (Grinding machine) รุ่น CF–6A ยี่ห้อ CHUANGLI จากประเทศจีน เครื่องอัดเม็ดชีวมวล (Pelletizing machine) รุ่น SF–125 ยี่ห้อ SEREN จากประเทศจีน และเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ (Automatic bomb calorimeter) รุ่น AC–500 ยี่ห้อ LECO จากประเทศสหรัฐอเมริกา

2. ขั้นตอนการอัดเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล

นำวัสดุชีวมวลมาตากแดดประมาณ 7 วันให้แห้ง จากนั้นนำเข้าเครื่องบดย่อย ให้มีขนาดที่สามารถผ่านตะแกรงขนาดรูตะแกรง 2 มิลลิเมตร แล้วนำชีวมวลมาทำการผสมกับตัวประสานให้เข้ากัน การเตรียมตัวประสานชนิดน้ำแป้งเปียกทำได้โดยนำแป้งมันสำปะหลัง 100 กรัม ละลายในน้ำ 1 ลิตร นำไปตั้งไฟให้ความร้อน และกวนจนน้ำแป้งมีลักษณะใสเหนียวข้น รวมระยะเวลาที่ใช้ในการกวนแป้งเปียก โดยประมาณ 4 นาที รอให้อุณหภูมิเย็นจึงนำไปใช้ผสมกับชีวมวล การผสมชีวมวลกับตัวประสานจะใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างชีวมวลต่อตัวประสานเท่ากับ 1 : 1 จากนั้นนำไปขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงด้วยเครื่องอัดชีวมวล ดังภาพที่ 1 จะอัดได้เม็ดรูปทรงกระบอกขนาดเล็กที่มี

ความยาวประมาณ 1–2 เซนติเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6 มิลลิเมตร จากนั้นนำเม็ดเชื้อเพลิงที่ได้ไปผึ่งแดดเป็นเวลา 7 วัน เพื่อลดความชื้นและทำให้เม็ดเชื้อเพลิงแห้งและประสานกัน ตัวอย่างของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่เตรียมได้ ดังภาพที่ 2 โดยทำการเก็บตัวอย่างในถุงซิปที่ปิดสนิท เพื่อรอไปวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่ได้ต่อไป

ภาพที่ 1 เครื่องอัดเม็ดเชื้อเพลิง

ภาพที่ 2 ตัวอย่างเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด (a) ชีวมวลอัดเม็ดจากขุยมะพร้าวผสมมูลเป็ด (60:40) และ (b) ชีวมวลอัดเม็ดจากขุยมะพร้าวผสมขี้เลื่อย (60:40)

3. การทดลองเพื่อการศึกษาชนิดของวัสดุที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด

ทำการอัดเม็ดชีวมวลโดยใช้ขุยมะพร้าวต่อวัสดุชนิดอื่นๆ ได้แก่ มูลไก่ มูลเป็ด มูลวัว แกลบ ขี้เลื่อย และใบมะม่วงที่อัตราส่วน 60 : 40 และใช้น้ำแป้งเปียกเป็นตัวประสานที่อัตราส่วนของชีวมวลต่อน้ำแป้งเปียกเท่ากับ 1 : 1 จากนั้นนำเชื้อเพลิงที่อัดได้ไปทำการผึ่งแดดให้แห้ง แล้วนำไปตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิง

4. การทดลองเพื่อการศึกษาชนิดของตัวประสานที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด

ทำการอัดเม็ดชีวมวลโดยใช้ตัวประสานเป็นน้ำแป้งเปียกและกากน้ำตาลที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักที่ต่างกัน คือ 100 : 0 75 : 25 50 : 50 25 : 75 และ 0 : 100 จากนั้นนำเชื้อเพลิงที่อัดได้ไปทำการผึ่งแดดให้แห้ง แล้วนำไปตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิง

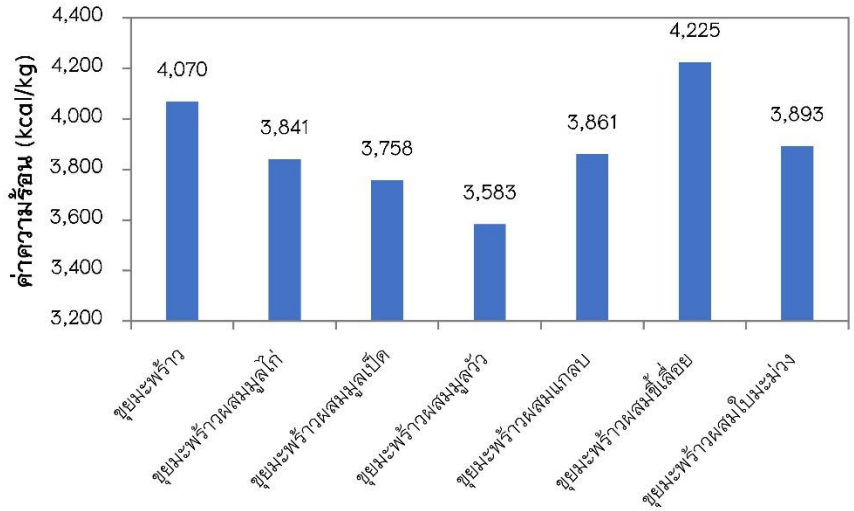
5. การตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด

ในการอัดเม็ดเชื้อเพลิงด้วยชีวมวลหรือตัวประสานที่แตกต่างกัน อาจทำให้คุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่ได้แตกต่างกัน จึงจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์หาคุณสมบัติ ดังนี้ การหาคุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิง ได้แก่ การวิเคราะห์ค่าความร้อน (ASTM D5865) ทำการวิเคราะห์ซ้ำ 2 ครั้ง จากนั้นคำนวณหาค่าเฉลี่ยและทำการวิเคราะห์ค่าองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ค่าความชื้น (ASTM D3173) ค่าเถ้า (ASTM D3174) ค่าสารระเหย (ASTM D3175) ค่าคาร์บอนคงตัว (ASTM D3172) โดยทำการวิเคราะห์ซ้ำ 3 ครั้ง จากนั้นคำนวณหาค่าเฉลี่ย

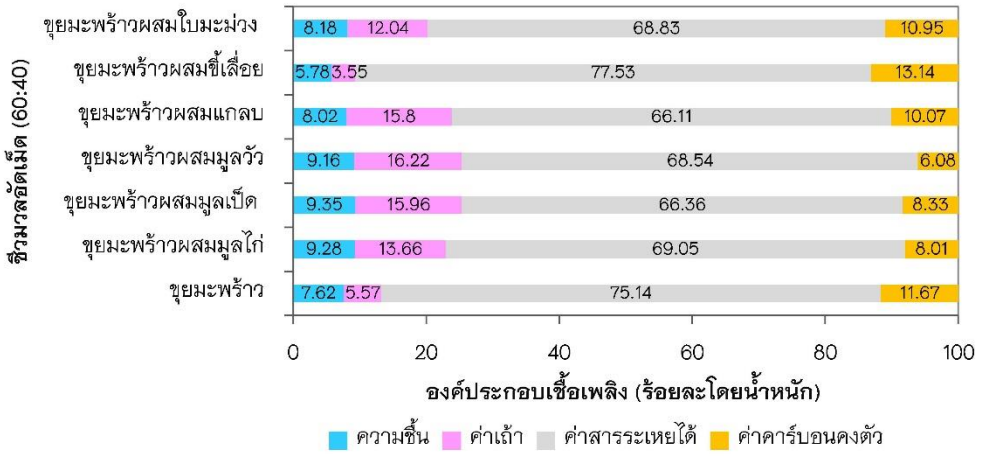
ผลการวิจัย

1. ผลวิเคราะห์การใช้วัตถุดิบในการอัดเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล

ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบคุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ได้จากการใช้วัสดุขุยมะพร้าวผสมกับวัสดุเหลือใช้ชนิดต่างๆ แสดงดังภาพที่ 3 และ 4



ภาพที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุดิบที่ใช้อัดเม็ดต่อค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ได้



ภาพที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระหว่างวัตถุดิบที่ใช้อัดเม็ดต่อองค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่ได้

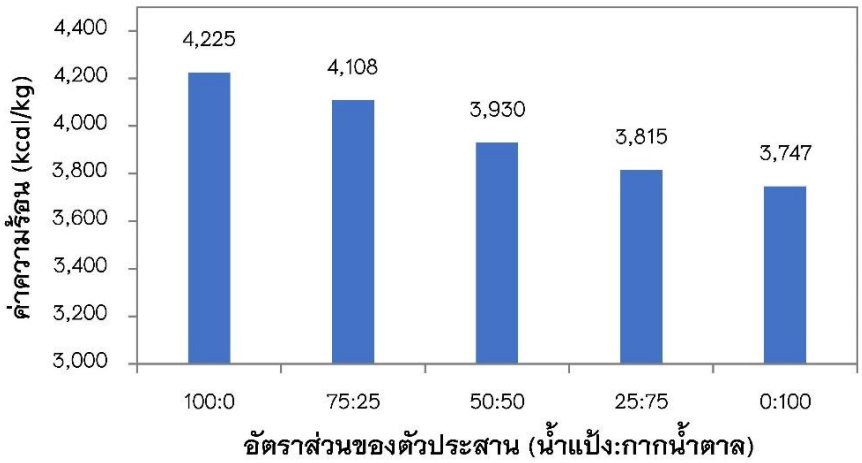
ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ได้จากการใช้วัสดุขุยมะพร้าวผสมกับวัสดุต่างๆ ได้แก่ มูลไก่ มูลเป็ด มูลวัว แกลบ ขี้เลื่อย และใบมะม่วง ที่อัตราส่วน 60 : 40 ดังตารางที่ 1 พบว่า ค่าความร้อนของเม็ดเชื้อเพลิงอยู่ในช่วง 3,583—4,225 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม (kcal/kg) โดยค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย และปริมาณคาร์บอนคงตัว อยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 5.78—9.35 3.55—16.22 66.11—77.53 และ 6.08—13.14 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางความร้อนจากภาพที่ 3 พบว่า การใช้ขี้เลื่อยเป็นส่วนผสมร่วมกับขุยมะพร้าว จะทำให้เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ได้มีค่าความร้อนที่สูงกว่าวัสดุร่วมชนิดอื่น โดยให้ค่าความร้อนสูงสุดเท่ากับ 4,225 kcal/kg ซึ่งมีค่าความร้อนที่สูงกว่าใบมะม่วง แกลบ มูลไก่ มูลเป็ด และมูลวัว ตามลำดับ และเมื่อทำการเปรียบเทียบองค์ประกอบของเชื้อเพลิง ดังภาพที่ 4 พบว่า การใช้ขี้เลื่อยเป็นส่วนผสม ยังช่วยปรับปรุงคุณภาพอื่นๆ ให้ดีขึ้น เมื่อเทียบกับการใช้ขุยมะพร้าวเพียงอย่างเดียว คือ ทำให้เชื้อเพลิงที่ได้มีปริมาณความชื้นต่ำลง และมีปริมาณสารระเหยที่สูงขึ้น มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงขึ้น มีปริมาณเถ้าที่น้อยลง ในขณะที่การใช้วัสดุอื่นร่วมกับขุยมะพร้าว ได้แก่ มูลไก่ มูลเป็ด มูลวัว แกลบ และใบมะม่วง พบว่ามีแนวโน้มทำให้คุณสมบัติของเชื้อเพลิงในด้านต่างๆ ลดต่ำลง เมื่อเทียบกับการใช้ขุยมะพร้าวเพียงอย่างเดียว

ตารางที่ 1 ผลของการใช้ขุยมะพร้าวผสมกับวัสดุเหลือทิ้งชนิดต่างๆ ที่อัตราส่วน 60 : 40 ต่อสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ได้

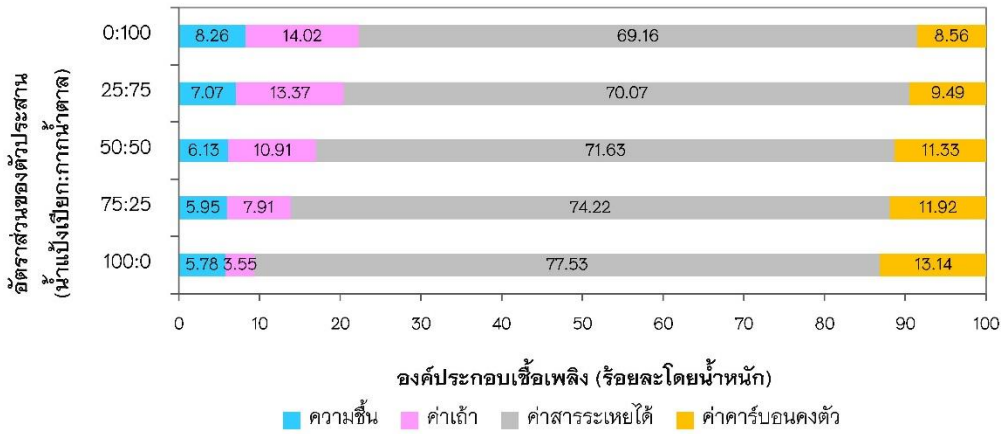
ชีวมวลที่ใช้	ค่าความร้อน	องค์ประกอบในเชื้อเพลิง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
(60 : 40)	(kcal/kg)	ความชื้น	ค่าเถ้า	ค่าสารระเหย	ค่าคาร์บอนคงตัว
ขุยมะพร้าว (100%)	4,070	7.62	5.57	75.14	11.67
ขุยมะพร้าวผสมมูลไก่	3,841	9.28	13.66	69.05	8.01
ขุยมะพร้าวผสมมูลเป็ด	3,758	9.35	15.96	66.36	8.33
ขุยมะพร้าวผสมมูลวัว	3,583	9.16	16.22	68.54	6.08
ขุยมะพร้าวผสมแกลบ	3,861	8.02	15.80	66.11	10.07
ขุยมะพร้าวผสมขี้เลื่อย	4,225	5.78	3.55	77.53	13.14
ขุยมะพร้าวผสมใบมะม่วง	3,893	8.18	12.04	68.83	10.95

2. ผลวิเคราะห์การใช้ตัวประสานในการอัดเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล

ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด และองค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่ได้จากการใช้ตัวประสาน น้ำแป้งเปียกและกากน้ำตาลที่อัตราส่วนต่างๆ ดังภาพที่ 5 และภาพที่ 6



ภาพที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของตัวประสานต่อค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ได้



ภาพที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของตัวประสานต่อองค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่ได้

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ได้โดยการใช้ตัวประสานที่ผสมระหว่างน้ำแป้งเปียกและกากน้ำตาลในอัตราส่วนต่างๆ ได้แก่ 100 : 0 75 : 25 50 : 50 25 : 75 และ 0 : 100 ดังตารางที่ 2 โดยพบว่าค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ได้อยู่ในช่วง 3,747–4,225 kcal/kg และองค์ประกอบเชื้อเพลิง ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย และปริมาณคาร์บอนคงตัว อยู่ในช่วงร้อยละ 5.78–8.26 3.55–14.02 69.16–77.53 และ 8.56–13.14 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ผลของอัตราส่วนของตัวประสานน้ำแป้งเปียกต่อกากน้ำตาลต่อสมบัติของเชื้อเพลิง

น้ำแป้งเปียก: กากน้ำตาล	ค่าความร้อน (kcal/kg)	องค์ประกอบในเชื้อเพลิง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
		ความชื้น	ค่าเถ้า	ค่าสารระเหย	ค่าคาร์บอนคงตัว
100 : 0	4,225	5.78	3.55	77.53	13.14
75 : 25	4,108	5.95	7.91	74.22	11.92
50 : 50	3,930	6.13	10.91	71.63	11.33
25 : 75	3,815	7.07	13.37	70.07	9.49
0 : 100	3,747	8.26	14.02	69.16	8.56

จากภาพที่ 5 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความร้อนจากการใช้อัตราส่วนต่างๆ ระหว่างน้ำแป้งเปียกกับกากน้ำตาล พบว่า เมื่อทำการใช้ปริมาณน้ำแป้งในสัดส่วนที่มากขึ้น มีแนวโน้มที่ทำให้ได้ค่าความร้อนที่สูงขึ้น โดยการใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสานเพียงอย่างเดียว (อัตราส่วน

100 : 0) จะทำให้ได้ค่าความร้อนสูงที่สุด (4,225 kcal/kg) นอกจากนี้ภาพที่ 6 ยังแสดงให้เห็นว่าการใช้ปริมาณแป้งเปียกในสัดส่วนที่มากขึ้น ส่งผลให้เชื้อเพลิงที่ได้มีคุณภาพที่สูงขึ้น ได้แก่ เชื้อเพลิงมีปริมาณความชื้นที่ต่ำลง ปริมาณเถ้าที่ลดลง ปริมาณสารระเหยที่สูงขึ้น และปริมาณคาร์บอนคงตัวที่สูงขึ้น

3. ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด

เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากขุยมะพร้าวผสมขี้เลื่อยในงานวิจัยนี้จัดเป็นเชื้อเพลิงเขียว โดยเป็นการอัดก้อนจากวัสดุชีวมวลโดยไม่ได้ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) ให้เป็นถ่าน ดังนั้นหากทำการเปรียบเทียบค่าความร้อนของชีวมวลอัดเม็ดในงานวิจัยนี้กับค่าความร้อนของมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่งและถ่านไม้หุงต้ม จะพบได้ว่าค่ามาตรฐานจะมีเกณฑ์ค่าความร้อนที่สูงกว่าเชื้อเพลิงเขียวอัดก้อนที่ได้ เนื่องจากเป็นมาตรฐานของเชื้อเพลิงถ่านที่ได้ผ่านกระบวนการเผาแล้ว ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติเชื้อเพลิงเขียวในงานวิจัยนี้กับเชื้อเพลิงเขียวอัดก้อนจากงานวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมา ดังตารางที่ 3 พบว่า เชื้อเพลิงเขียวอัดเม็ดที่ได้จากขุยมะพร้าวผสมกับขี้เลื่อย (60:40) ในงานวิจัยนี้ มีค่าความร้อนเท่ากับ 4,225 kcal/kg ซึ่งอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกับแท่งเชื้อเพลิงเขียวจากงานวิจัยอื่นซึ่งมีค่าความร้อนอยู่ในช่วง 3,389—5,802 kcal/kg โดยเชื้อเพลิงอัดเม็ดในงานวิจัยนี้มีค่าความร้อนที่สูงกว่าแท่งเชื้อเพลิงจากเปลือกสับปะรด กิ่งสบู่ดำ เปลือกลำไยผสมฟางข้าว เปลือกมะขาม เปลือกทุเรียน เปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟผสมกากกาแฟ และทางมะพร้าว ซึ่งมีค่าความร้อนเท่ากับ 3,389 3,671 3,698 3,764 3,901 4,127 และ 4,141 kcal/kg ตามลำดับ และเชื้อเพลิงในงานวิจัยนี้มีค่าความร้อนที่ต่ำกว่าเชื้อเพลิงเขียวจากเปลือกมังคุดและฟางข้าวผสมซังข้าวโพดซึ่งมีค่าความร้อนเท่ากับ 4,948 และ 5,802 kcal/kg ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาสมบัติอื่นๆ ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย และปริมาณคาร์บอนคงตัว พบว่า เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ได้ในงานวิจัยนี้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับคุณสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงเขียวอื่นๆ ที่นำมาเปรียบเทียบ นอกจากนี้ยังพบว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ได้ยังมีสมบัติด้านเชื้อเพลิงที่ดี โดยมีค่าความชื้นผ่านเกณฑ์ผลิตภัณฑ์ชุมชน ถ่านอัดแท่งและถ่านไม้หุงต้ม ซึ่งกำหนดให้ค่าความชื้นไม่เกินร้อยละ 8 และ 10 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และมีค่าเถ้าที่ผ่านเกณฑ์ผลิตภัณฑ์ชุมชน ถ่านไม้หุงต้ม ซึ่งกำหนดให้ค่าเถ้าไม่เกินร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาปริมาณสารระเหย จะพบได้ว่าเชื้อเพลิงเขียวในงานวิจัยนี้และงานวิจัยที่ผ่านมาจะมีปริมาณสารระเหยที่มีค่าใกล้เคียงกันในช่วงระหว่างร้อยละ 63.3—88.37 ซึ่งมีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่งที่กำหนดค่าสารระเหยไว้ไม่เกินร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบคุณสมบัติของเชื้อเพลิงเขียวอัดเม็ดที่ผลิตจากขุยมะพร้าวผสมกับขี้เลื่อยในงานวิจัยนี้ กับเชื้อเพลิงเขียวอัดแท่งในงานวิจัยที่ผ่านมา

ชีวมวลที่ใช้	ค่าความร้อน (kcal/kg)	องค์ประกอบในเชื้อเพลิง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)				อ้างอิง
		ความชื้น	ค่าเถ้า	ค่าสารระเหย	ค่าคาร์บอนคงตัว	
ขุยมะพร้าวผสมขี้เลื่อย	4,225	6.78	3.55	76.53	13.14	งานวิจัยนี้
เปลือกสับประรด	3,389	20.5	3.1	63.3	13.0	ธนาพล และคณะ (2558)
กิ่งสบู่ดำ	3,671	–	–	–	–	เกรียงไกร และคณะ (2554)
เปลือกลำไยผสมฟางข้าว	3,698	7.39	5.00	85.73	1.88	ลดาวัลย์ และคณะ (2559)
เปลือกมะขาม	3,764	3.96	4.50	81.13	10.41	กิ่งกานต์ และคณะ (2557)
เปลือกทุเรียน	3,901	6.68	4.57	88.37	0.37	อัจฉรา และคณะ (2554)
เปลือกหุ้มเมล็ดผสมกาก-กาแฟ	4,127	–	–	–	–	จุฑาภรณ์ และกนกวรรณ (2561)
ทางมะพร้าว	4,141	7.30	5.30	76.80	10.70	ธนาพล และคณะ (2558)
เปลือกมังคุด	4,348	5.65	5.03	86.55	2.77	อัจฉรา และคณะ (2554)
ฟางข้าวผสมซังข้าวโพด	5,802	–	–	–	–	ศิรินุช และคณะ (2548)
มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ถ่านอัดแท่ง	ไม่น้อยกว่า 5,000	ไม่เกิน 8	–	–	–	มผช. 238/2547
มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ถ่านไม้หุงต้ม	ไม่น้อยกว่า 6,000	ไม่เกิน 10	ไม่เกิน 8	ไม่เกิน 25	–	มผช. 657/2547

อภิปรายผล

เมื่อทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ได้จากขุยมะพร้าวผสมกับวัสดุชีวมวลชนิดต่างๆ ที่อัตราส่วน 60 : 40 พบว่า เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตจากวัสดุชีวมวลเหลือใช้ที่แตกต่างกัน จะส่งผลต่อสมบัติของเชื้อเพลิงที่แตกต่างกัน การใช้ขี้เลื่อยเป็นส่วนผสมร่วมกับขุยมะพร้าวจะทำให้เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ได้มีค่าความร้อนที่สูงที่สุด ซึ่งมีค่าความร้อนที่สูงกว่าการใช้วัสดุชีวมวลชนิดอื่น ได้แก่ ใบมะม่วง แกลบ มูลไก่ มูลเป็ด และมูลวัว ตามลำดับ นอกจากนี้ การใช้ขี้เลื่อยเป็นส่วนผสมยังช่วยปรับปรุงคุณภาพอื่นๆ ให้ดีขึ้น คือ ทำให้เชื้อเพลิงที่ได้มีความชื้นต่ำลง และมี

ปริมาณสารระเหยที่สูงขึ้น ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการติดไฟที่ง่ายขึ้น และส่งผลให้มีค่าความร้อนที่สูงด้วย (จุฑาภรณ์, 2562; ลดาวัลย์ และคณะ, 2559) และยังทำให้เชื้อเพลิงที่ได้มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงขึ้น ที่ช่วยส่งผลทำให้เกิดการเผาไหม้เพิ่มขึ้น รวมถึงส่งผลให้เชื้อเพลิงมีปริมาณเถ้าที่น้อยลง ซึ่งปริมาณเถ้าที่น้อยลงนี้จะช่วยลดปัญหาในการเผาไหม้และการกำจัดเถ้า (ลดาวัลย์ และคณะ, 2559) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนกับค่าความชื้นของเชื้อเพลิงที่ได้ พบว่า เชื้อเพลิงที่มีค่าความชื้นมากมีแนวโน้มที่จะมีค่าความร้อนที่น้อยลง ซึ่งอาจเป็นผลจากวัสดุที่มีความชื้นมากจะทำให้จุดติดไฟยาก เพราะความชื้นที่มากขึ้นจะทำให้มีการสูญเสียความร้อนไปกับการระเหยความชื้นในระหว่างการเผาไหม้ จึงส่งผลให้ค่าความร้อนที่ได้ต่ำลงได้ (วิราช, 2560) นอกจากนี้ยังพบว่าเชื้อเพลิงที่มีค่าคาร์บอนคงตัวที่สูงมีแนวโน้มที่จะมีค่าความร้อนที่สูงขึ้นด้วย ค่าความร้อนของการสันดาปยังขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนในเชื้อเพลิงอัดเม็ดด้วย ดังนั้น เชื้อเพลิงที่มีค่าพลังงานความร้อนสูง จึงมีปริมาณคาร์บอนคงตัวที่เป็นองค์ประกอบอยู่สูง มีความชื้นต่ำและมีปริมาณเถ้าต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานวิจัยของกนกพงษ์ และคณะ (2562); กิ่งกานต์ และคณะ (2557)

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความร้อนจากการใช้อัตราส่วนต่างๆ ระหว่างน้ำแป้งเปียกกับกากน้ำตาล พบว่า เมื่อทำการใช้น้ำแป้งเปียกในอัตราส่วนที่มากขึ้น จะส่งผลให้เชื้อเพลิงมีคุณสมบัติด้านความร้อนของเชื้อเพลิงที่ดีขึ้น คือ มีแนวโน้มที่ทำให้ได้ค่าความร้อนที่สูงขึ้นกว่าการใช้กากน้ำตาล ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ อนุสรา และคณะ (2562) และยังส่งผลให้เชื้อเพลิงที่ได้มีคุณภาพที่สูงขึ้น คือ มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงขึ้นที่จะช่วยทำให้เกิดการเผาไหม้เพิ่มขึ้น การมีปริมาณเถ้าที่ลดลงที่เป็นของเสียต้องกำจัดน้อยลง รวมถึงการมีค่าความชื้นที่ลดต่ำลงที่ส่งผลทำให้คุณสมบัติทางด้านความร้อนของเชื้อเพลิงมีค่าสูงขึ้น และปริมาณสารระเหยได้ที่สูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่อการติดไฟที่ง่ายขึ้น (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2555)

จากการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเชื้อเพลิงในงานวิจัยนี้กับเชื้อเพลิงจากงานวิจัยอื่นที่ผ่านมา พบว่า เชื้อเพลิงเขียวที่ได้จากงานวิจัยนี้ มีคุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่อยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกับแท่งเชื้อเพลิงเขียวจากงานวิจัยอื่นที่นำมาเปรียบเทียบ รวมทั้งให้ค่าความชื้นและค่าเถ้าที่เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ถ่านอัดแท่งและถ่านไม้หุงต้ม ซึ่งแสดงให้เห็นว่า วัสดุชีวมวลเหลือใช้ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทน อย่างไรก็ตาม เชื้อเพลิงเขียวอัดเม็ดในงานวิจัยนี้เป็นเชื้อเพลิงที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชันให้เป็นถ่าน จึงทำให้มีค่าความร้อนที่ต่ำกว่าและมีปริมาณสารระเหยที่สูงกว่าถ่านทั่วไป ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการศึกษาของ เตือนใจ และคณะ (2561); ธนาพล และคณะ (2558)

สรุปผลการวิจัย

จากการพัฒนาเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ ขุยมะพร้าว ร่วมกับวัสดุเหลือใช้ที่หาได้ง่ายจากชุมชน ได้แก่ มูลสัตว์ต่างๆ แกลบ ขี้เลื่อย และใบมะม่วง และใช้วัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมแปรรูปเกษตรมาเป็นตัวประสาน ได้แก่ น้ำแป้งเปียกและกากน้ำตาล โดยนำมาผ่านกระบวนการขึ้นรูปอัดเม็ดเป็นเชื้อเพลิง พบว่า วัสดุเหลือทิ้งดังกล่าวในชุมชน มีศักยภาพในการนำมาทำเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด เนื่องจากให้สมบัติเชื้อเพลิงอยู่ในเกณฑ์ที่ดี เนื่องจากมีค่าความร้อนที่ใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงเขียวชนิดอื่นๆ ในงานวิจัยที่ผ่านมา โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อนำขุยมะพร้าวมาใช้ผสมร่วมกับขี้เลื่อย (60 : 40) จะทำให้ได้เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีค่าความร้อนสูงสุดเมื่อเทียบกับวัตถุดิบร่วมชนิดอื่นๆ ในการทดลอง นอกจากนี้การใช้น้ำแป้งเปียกเป็นตัวประสานจะที่ให้ค่าความร้อนที่สูงกว่าการใช้กากน้ำตาล แต่อย่างไรก็ตามการใช้ตัวประสานทั้งสองชนิดสามารถทำให้ได้เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีค่าความร้อนอยู่ในระดับเดียวกับเชื้อเพลิงเขียวชนิดอื่นๆ ในงานวิจัยที่ผ่านมา รวมทั้งมีค่าความชื้นและค่าเถ้าที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานชุมชนในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าขุยมะพร้าวและขี้เลื่อย ซึ่งเป็นวัสดุชีวมวลเหลือใช้ที่มีศักยภาพ สามารถนำมาขึ้นรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดได้ และมีคุณสมบัติด้านเชื้อเพลิงที่ดีเพียงพอในการนำมาใช้เป็นพลังงานทางเลือก ผลงานวิจัยนี้จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทนจากชีวมวล และเป็นแนวทางของการใช้ทรัพยากรในชุมชนให้เกิดประโยชน์ ช่วยลดปริมาณวัสดุเหลือใช้และช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาว อย่างไรก็ตาม วัสดุเหลือทิ้งในแต่ละพื้นที่ชุมชนอาจแตกต่างกันไป การเลือกวัสดุมาใช้จึงต้องดูความเหมาะสมทั้งในด้านของปริมาณวัตถุที่เพียงพอ หาง่ายและมีทั่วไปในท้องถิ่น และควรเป็นวัสดุที่มีศักยภาพดีในการเป็นเชื้อเพลิง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมืออุปกรณ์และสถานที่ ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

กนกพงษ์ ศรีเที่ยง, สุริยงค์ ประชาเขียว, และสรายุธ บุญช่วย. (2562). การพัฒนาผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งจากเปลือกสับประรด. **วารสารวิจัยเทคโนโลยีนวัตกรรม, 3**(1), 101—110.

กรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2558). **แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558–2579.** สืบค้นเมื่อ 9 มิถุนายน 2563, จาก http://www.eppo.go.th/images/POLICY/PDF/AEDP2015.pdf

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2555). **คู่มือแนวทางและเกณฑ์คุณสมบัติของเสียเพื่อการแปรรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิงและบล็อคประสาน.** กรุงเทพฯ.

กิ่งกานต์ พันธุวาณิชย์, พิสิษฐ์ มณีโชติ, และวันชัย วิหงสา. (2557). การศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงเขียวจากวัสดุเหลือทิ้งจากการแปรรูปมะขาม. ใน **รายงานการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 1** (น. 222–226) กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์.

เกรียงไกร วงศาโรจน์, ธนิต สวัสดิ์เสวี, นริส ประทินทอง, และประธาน วงศ์ศริเวช. (2554). การผลิตแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลจากสบู่ดำ. **วิศวกรรมสาร มข., 38**(1), 65–72.

คงเดช พะสีนาม, ธันวมาส กาศสนุก, เกียรติศักดิ์ นิคมชัยประเสริฐ, และวีรชัย อาจหาญ. (2562). การศึกษาสมรรถนะและการสึกหรอของเครื่องยนต์ดีเซลรอบปานกลางเมื่อใช้น้ำมันไบโอดีเซล. **PSRU Journal of Science and Technology, 4**(1), 28–38.

จุฑาภรณ์ ชนะถาวร, และกนกวรรณ ภูมิวณิชกิจ. (2562). ผลของเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟต่อสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด. **วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร, 13**(1), 78—89.

ชิษณุชา แซ่ม้า, และขวัญฤทัย ทองบุญฤทธิ์. (2559). การศึกษาประสิทธิภาพถ่านอัดแท่งจากซังข้าวโพดและเหง้ามันสาปะหลัง. ใน **รายงานการประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร ครั้งที่ 3** (น.608—613) กำแพงเพชร: มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร.

เตือนใจ ปิยัง, อเนก สาวะอินทร์, และนฤทธิ์ กล่อมพงษ์. (2561). การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุเศษเหลือในสวนปาล์มน้ำมัน บ้านห้วยยูง จังหวัดกระบี่. **วารสารวิจัยเพื่อการพัฒนาเชิงพื้นที่, 10**(5), 365—374.

ธนาพล ตันติสัตยกุล, กะชามาศ สายดำ, สุจิตรา ภูส่งสี, และศิวพร เงินเรืองโรจน์. (2558ก). การศึกษาความเหมาะสมการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งจากเปลือกสับปะรด. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 23**(5), 754–773.

ธนาพล ตันติสัตยกุล, สุริฉาย พงษ์เกษม, ปรีย์ปวีณ ภูหญ้า, และภานุวัฒน์ ไถ้บ้านกวย. (2558ข). พลังงานทดแทนชุมชนจากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งจากทางมะพร้าว. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 23**(3), 418—431.

ประลอง ดำรงไทย. (2550). **แท่งเชื้อเพลิงเขียวเพื่อทดแทนฟืนและถ่าน.** สืบค้นเมื่อ 18 มกราคม 2563, จาก http://www.dnp.go.th/research/Knowledge/green_fuel.htm

ปัญจรัตน์ โจลานันท์, อานนท์ ไทยกรณ์, และภัชยานันท์ ย่างไพบูลย์. (2559). การพัฒนาแท่งเชื้อเพลิงจากชีวมวลเหลือทิ้งวิสาหกิจชุมชนกาแฟสดแม่ตอน อำเภอดอยสะเก็ด จังหวัดเชียงใหม่. **วารสาร มทร. อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 9**(3), 70—81.

ลดาวัลย์ วัฒนะจีระ, ณรงค์ศักดิ์ ลาปัน, วิภาวดี ชัชวาล, และอานันท์ ธัญญเจริญ. (2559). การพัฒนาก้อนเชื้อเพลิงชีวมวลจากเศษฟางข้าวผสมเศษลำไยเหลือทิ้ง. **วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ., 39**(2), 239—255.

วิราช กิ่งวิชิต. (2560). **การผลิตพลังงานทดแทนจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร**. (เอกสารวิจัยส่วนบุคคล). วิทยาลัยการทัพบก, กรุงเทพฯ. 13 หน้า.

วิลาสินี หอมระรื่น, และวิสาขา ภู่จินดา. (2562). แนวทางการใช้ประโยชน์จากเปลือกทุเรียนและเปลือกมังคุดเป็นเชื้อเพลิงเขียวอัดแท่งและปุ๋ย: กรณีศึกษาอำเภอแก่งหางแมว จังหวัดจันทบุรี. **วารสารดุษฎีบัณฑิตทางสังคมศาสตร์, 9**(2), 452—466.

ศิรินุช จินดารักษ์, พร หมอนแพร, ลอย ใจจุน, และไพฑูรย์ ถาวรวงศ์. (2548). แท่งเชื้อเพลิงเขียวจากฟางข้าวและซังข้าวโพด. **วารสารวิทยาศาสตร์ทักษิณ, 2**(2), 78—90.

ศิริวัชรี จำปางาม, พีรนาฏ คิดดี, และวิกาญดา ทองเนื้อแข็ง. (2563). การศึกษาประสิทธิภาพและคุณภาพของธูปที่ผลิตจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร. **PSRU Journal of Science and Technology, 5**(2), 59–71.

อนุสรา งามเลิศ, เขมนิจจารีย์ สาริพันธ์, และประนิตตา เพ็งงิ้ว. (2562). ชนิดของตัวประสานที่เหมาะสมในการผลิตถ่านอัดแท่งจากเปลือกยูคาลิปตัส. **วารสารวิชาการเทพสตรี, 14**(2), 27—38.

อัจฉรา อัศวรุจิกุลชัย, ชลันดา เสมสายัณห์, นัฐพร ประภักดี, ณัฐธิดา เปี่ยมสุวรรณศิริ, และนิภาวรรณ ชูชาติ. (2557). การนำเปลือกทุเรียนและเปลือกมังคุดมาใช้ประโยชน์ในรูปเชื้อเพลิงอัดแท่ง. ใน **การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 49** (น. 162–168), กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Rengsirikul, K., Ishii, Y., Kangvansaichol, K., Sripichitt, P., Punsuvon, V., Vaithanomsat, P., Nakamanee, G., & Tudsri S. (2013). Biomass Yield, Chemical Composition and Potential Ethanol Yields of 8 Cultivars of Napiergrass (Pennisetum purpureum Schumach.) Harvested 3—Monthly in Central Thailand. **Journal of Sustainable Bioenergy Systems, 3**(2), 107—112.